

補助事業番号 2021M-128

補助事業名 2021年度 カセンサレス駆動力推定による全方位移動型電動歩行器の知能化
デザイン 補助事業

補助事業者名 慶應義塾大学 村上俊之研究室

1 研究の概要

本事業ではメカナムホイールを用いた全方位移動型電動歩行補助器の構築を行った。メカナム機構については従来から多くの研究があり、歩行器への応用も見られるが、カセンサレスの駆動力制御によるすべり動作防止や障害物との接触検知機能を歩行器に組み入れたものは見られない。メカナム機構は全方位への移動を可能とする一方で、路面の不正によるすべりや障害物との接触が生じやすい欠点を有しており、安全・安心を優先した電動歩行補助器のために、これらを考慮した歩行器開発を行っている。また、制御アルゴリズムのみに特化した開発ではなく、滑り難い機構や障害物との接触検知が行いやすい歩行器自体のフレーム構造の開発も行った。

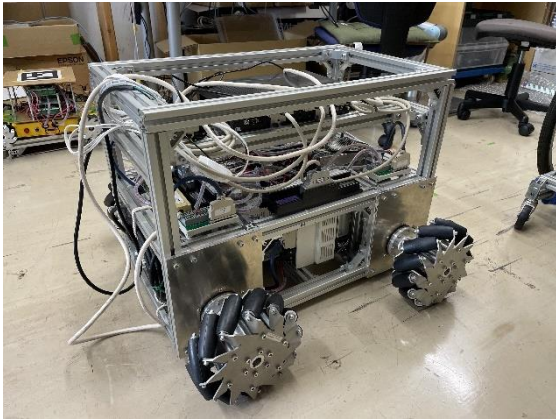
2 研究の目的と背景

本事業では、初期の筋萎縮性側索硬化症（以下、ALS）を患う歩行器利用者を中心とした電動歩行補助器の知能化デザインを目的としている。ALS患者は上肢、下肢の動きが次第に衰えてしまう症状を持っており、近年では若年層においても患者が見られるようになってきている。ALS患者においては、自由な移動が生きがいを感じるものとなり、それを可能とする電動歩行器が実現できれば上肢、下肢の動作の衰えを遅らせる効果も期待できる。しかしながら、現状ではこうした障がい者に適するインターフェースや移動自由度を有する歩行器が存在しない。電動歩行補助器における移動の多自由度化において、本事業ではメカナムホイールを利用する。従来からメカナムホイールを用いた車椅子をはじめとする移動システムの構築は多く行われているが、路面状態が不正の場合にすべりやすい等、移動時の安定性が確保しにくい問題があった。本事業では、メカナムホイールの駆動力制御を力（トルク）センサレスで行うことで、外部との障害物検知を含め、安全・安心が得られる全方位同型電動歩行補助器の知能化制御の開発を行った。最終的に介護者、被介護者の両方に優しい電動歩行補助器の実現を目指したものとなっている。

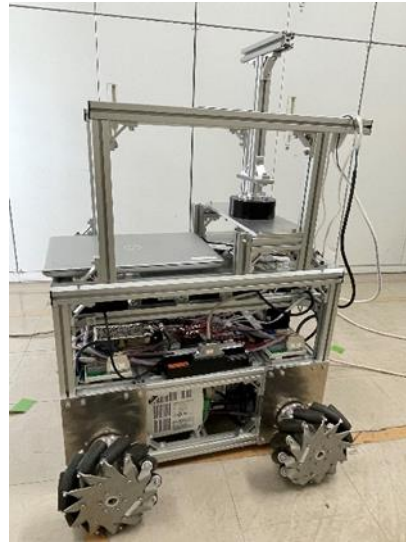
3 研究内容

(1) 全方位移動型電動歩行補助器の機構設計

本事業で構築した電動歩行補助器の外観図を図1に示す。メカナムホイールを用いることで、全方位移動可能な移動車となっており、歩行補助器利用者の移動意思を機構的な拘束を受けることなく実現できる機構となっている。メカナムホイールを駆動する電動機の電源や制御系を実装する各種CPUシステムについては歩行補助器内に全て設置できるような機構としており、歩行の妨げにならないような機構設計としている。



(a) 歩行補助器台車（側面より）



(b) 歩行補助器台車（支持アーム付き）

図1: 製作した電動歩行補助器の外観

(2) カセンサレス制御のためのヤコビ行列推定アルゴリズムの構築とその実装

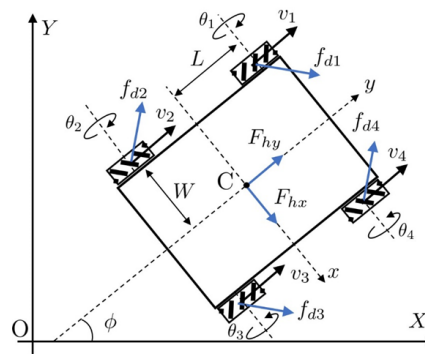
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{L+W} & -\frac{1}{L+W} & \frac{1}{L+W} & \frac{1}{L+W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

$$v_i = R\dot{\theta}_i \quad (2.30)$$

滑りが無い場合

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{L+W} & -\frac{1}{L+W} & \frac{1}{L+W} & \frac{1}{L+W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = T^+ \dot{\theta}$$



全方向移動歩行補助車のモデル.

| | | | | |
|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|----------------|
| R : 車輪半径 | θ_i : 車輪の回転角 | ϕ : 旋回角 | L : ホイールベースの半分の長さ | X, Y : 絶対座標系 |
| θ_i : 車輪の回転角 | F_h : 外力 | ϕ : 旋回角 | W : トレッドの半分の長さ | x, y : 車体座標系 |
| v_i : 車輪の並進速度 | F_h : 外力 | ϕ : 旋回角 | W : トレッドの半分の長さ | f_{di} : 駆動力 |

図2: 滑りが無い場合の歩行補助車の運動学関係式

図2に図1に示した電動歩行補助器の実験機に対して求めた運動学関係式を纏める。一般に全方位移動車として構成されたシステムでは滑りを利用した移動となるため、滑りを無視した制御系の構成を行う必要がある。しかしながら、滑りの物理モデルを図2に盛り込むことは困難であり、不正確なモデルを組み込んでしまうと運動制御の制御性能が低下しかねない危惧もある。そこで、本事業では滑りの影響を車輪径の変動によるものと仮定し、車輪径の変動を見かけ上の等価車輪径の変動を推定することで、その推定車輪径を運動学関係式に組み込み、滑りに対してロバストな運動制御系のアルゴリズム構築を行った。この概念に基づき図2の運動学関係式の修正を行ったものを図3に示す。提案アルゴリズムでは、推定した等価車輪径を用いて運動制御において重要となるヤコビ行列の導出を行っており、滑りに関する複雑かつ非線形なダイナミクスをモデル化しているものではない。そのため、モデル化誤差の影響も受けにくく、また制御アルゴリズムの実装も行い易い。

のとなっている。さらに、等価車輪径を用いたヤコビ行列を用いることで、各メカナムホイールの駆動力の算出も行え、カセンサレス制御において重要となる外力の推定も精度よく行うことが可能となる。

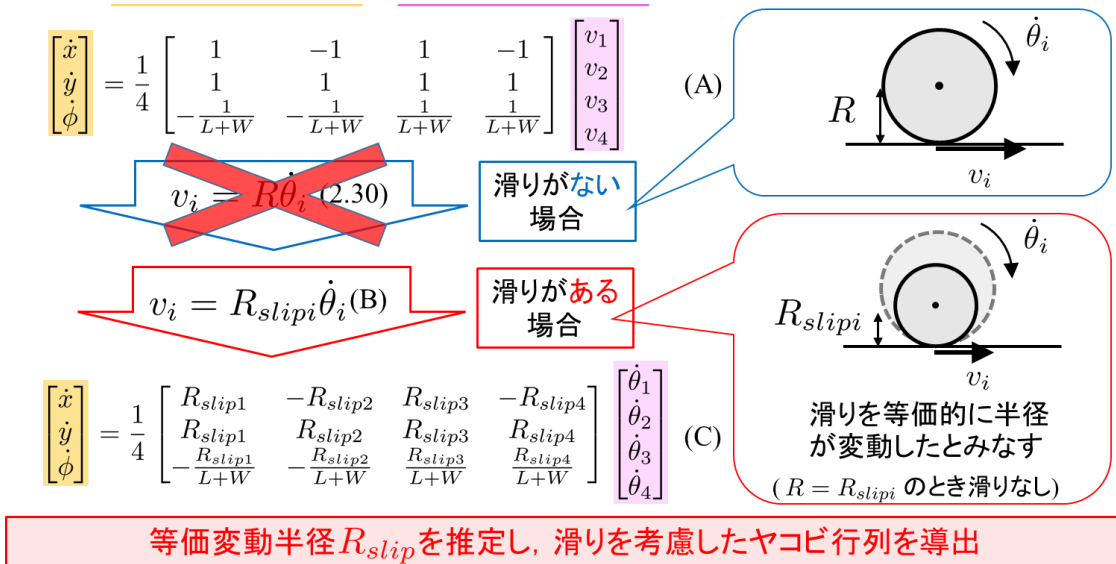


図3：滑りを考慮した運動学関係式

4 本研究が実社会にどう活かされるか一展望

社会的課題の現状でも述べたように、高齢化社会を迎えている現状において、誰もが自由な移動を可能にするシステムの構築は非常に重要である。特にALS患者に着目すると、若者の中にもALS患者が見られるようになってきている。ALS患者は上肢・下肢が不自由な状況においても頭脳明晰であることが多く、自由な移動は大きな生きがいにもつながる。こうした状況で、今後の多様化社会において自由な移動を安全にサポートできる多自由度歩行器の開発は必要不可欠であり、日本が世界をリードできる安全・安心技術となり得ると考えている。本事業で開発した電動歩行補助器も全方位移動が可能であり、さらにカセンサレスでの操作を可能としており、今後も様々な補助機器への展開が期待できると考えている。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本事業では、全方位移動型電動歩行器においてメカナムホイールを用いた駆動機構を導入し、可変重心機構と各ホイールの駆動力の力(トルク)センサレス制御により、すべりフリーの動作制御が実現できる点に新規性を有する。従来から全方位移動機構に関する提案は多く見られるが、センサレスによるすべり抑制制御を実現している例はない。また、本事業での開発アルゴリズムは、すべりに加えて障害物との接触検知もカセンサレス行えるものとなっており、全方位移動型電動歩行器の安全・安心制御において非常に重要な新規性と考えている。こうした点は、過去において本事業に携わった研究グループが開発してきたカセンサレスアルゴリズムに基づいたものとなっている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. K. Hirata, M. Sasayama, T. Murakami, "Realization of Synchronized Movement between Caregiver and Electric Wheelchair", SIE2021-Kyoto (The 30th International Symposium on Industrial Electronics), June 20-23, 2021.(JKA謝辞あり：車椅子の高機能化制御に関する論文)
2. T. Ohhira, T. Murakami, "Robust Stabilization Control of an Inverted Pendulum Type Robotic Wheelchair", Proceedings of the SICE Annual Conference 2021, September 8-10, 2021, Tokyo, Japan (JKA謝辞なし：車椅子の高機能化制御に関する論文)
3. T. Ohhira, A. Shimada, T. Murakami, "Variable Forgetting Factor-Based Adaptive Kalman Filter With Disturbance Estimation Considering Observation Noise Reduction", IEEE Access (Volume: 9), pp 100747 - 100756, 2021. (JKA謝辞あり：力制御の高機能化に関する論文)
4. Y. Tawaki, T. Nishimura, T. Murakami, "Linear Langevin-Based Models Providing Predictive Descriptive Statistics for Postural Sway", IEEE Access (Volume: 9), pp 114485 - 114494, 2021. (JKA謝辞あり：人の動作モデル化に関する論文)
5. A. Hiraoka, T. Murakami, "An Approach of Load-Side Disturbance Rejection Control for Series Elastic Actuators", IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control February 18-20, 2022 - Padova, Italy, pp18-23. (JKA謝辞あり：機構の振動制御に関する論文)
6. O. Kentaro, T. Murakami, "Estimation of Jacobian Matrix without accelerometer on Omni-directional Mobile Walker", IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control, February 18-20, 2022 - Padova, Italy, pp329-334. (JKA謝辞あり：メカナムホイールシステムの運動制御に関する論文)
7. T. Takenouchi, T. Murakami, "Performance Improvement of Bilateral Control under Time Delay using Gain Adjustment", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp481-484. (JKA謝辞あり：人による遠隔操作の運動制御に関する論文)
8. Y. Matsumoto, T. Murakami, " Ankle Angle Control Strategy for Passive/Active Unified Walking Based on Dynamics of Impact", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp489-494. (JKA 謝辞あり：人の歩行解析に関する論文)
9. T. Sugaya, T. Murakami, " Attitude and Velocity Control of Quadcopter with Suspended-Payload with Payload Stabilization Control", IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, March 8th-10th, 2022, pp489-494. (JKA 謝辞あり：力情報に基づく不安定系の制御に関する論文)

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

(1) 補助事業により作成したもの

2021年度 カセンサレス駆動力推定による全方位移動型電動歩行器の知能化デザイン
補助事業 報告書 (9項+関連論文)

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/JKA2021/2021jka_report-chukan.pdf

https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/JKA2021/2021jka_report-final.pdf

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 慶應義塾大学 理工学部 村上俊之研究室

(ケイオウギジユクダイガク リコウガクブ ムラカミシユキケンキュウシツ)

住 所： 〒223-8522

神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

担 当 者： 教授 村上俊之(キョウジュ ムラカミシユキ)

担 当 部 署： システムデザイン工学科(システムデザインコウガクカ)

E - m a i l: mura@sd.keio.ac.jp

U R L: <https://www.murakami.sd.keio.ac.jp/>